

二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出  
平成 28 年度採択研究代表者

H28 年度 実績報告書
-----------------

若林 整

東京工業大学工学院  
教授

二次元 TMDC 相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と応用

## § 1. 研究実施体制

### (1) 「すずかけ台」グループ

- ① 研究代表者: 若林 整 (東京工業大学工学院、教授)
- ② 研究項目
  - ・TMDC 研究統括

### (2) 「大岡山」グループ

- ① 主たる共同研究者: 小田 俊理 (東京工業大学科学技術創成研究院、教授)
- ② 研究項目
  - ・TMDC デバイス評価・設計

### (3) 「生田」グループ

- ① 主たる共同研究者: 小椋 厚志 (明治大学理工学部、教授)
- ② 研究項目
  - ・TMDC 膜評価および CVD

## § 2. 研究実施の概要

二次元 (Transition-Metal Di-Chalcogenide) TMDC 相補型 MISFETs の LSI プロセスによる性能向上と応用に向けて、すずかけ台グループはスパッタ法による TMDC 成膜とデバイス化に取り組んでいる。特に H28 年度は  $\text{MoS}_2$  膜のスパッタ条件最適化と硫化によるキャリア濃度低減、さらにコンタクト抵抗低減に取り組んだ。特に、 $400^\circ\text{C}$  高温スパッタにより形成した  $\text{MoS}_2$  膜について、硫黄欠損による高キャリア濃度 ( $10^{17}\text{-}10^{16} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  程度) を、格子間硫黄を原料に  $3\%\text{-H}_2$  を含む不活性ガス (Forming Gas: F.G.) 中で  $400^\circ\text{C}$  程度での熱処理することにより結晶性を向上し、図の通りキャリア濃度を  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  程度まで低減でき、ホール効果移動度を  $36 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  程度に向上することができた[1]。

また大岡山グループは TMDC デバイス評価・設計に取り組んでいる。特に H28 年度は、n-Octa-Decyl-Phosphonic Acid (ODPA) による自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer: SAM) 絶縁膜上に Poly Di-Methyl-Siloxane (PDMS) 弾性膜を用いて  $\text{MoS}_2$  膜を転写することで、理想的にダングリングボンドが存在しない絶縁膜と半導体の界面準位密度が低い *n*MOSFET を実現し、絶縁膜とチャネル膜が厚くても比較的低い S 値  $96 \text{ mV}/\text{dec}$  を達成した[2]。

さらに共同研究を実施している UCSB では TMDC device modeling に取り組んでいる。特に H28 年度は、各グループの材料特性や電気特性の向上に関するコンサルティングを通じて研究推進に貢献した。

次に生田グループは、TMDC 膜評価および CVD による TMDC 成膜に取り組んでいる。特に H28 年度は、CVD の要素技術として、バブリングで輸送した有機プリカーサ ( $(\text{t-C}_4\text{H}_9)_2\text{S}_2$ ) 中での最高  $440^\circ\text{C}$  の熱処理により、スパッタ  $\text{MoS}_2$  膜の硫化により結晶性向上を実証した[3]。

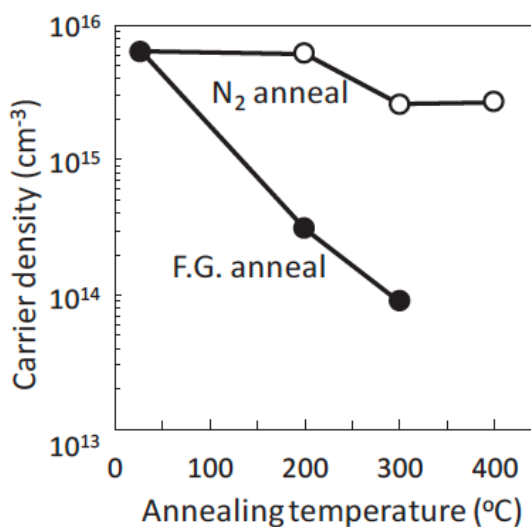


図: キャリア密度の F.G. 熱処理温度依存性.

### 代表的な原著論文

- [1] Jun'ichi Shimizu, Takumi Ohashi, Kentaro Matsuura, Iriya Muneta, Kuniyuki Kakushima, Kazuo Tsutsui and Hitoshi Wakabayashi, "High-mobility and low-carrier-density sputtered MoS<sub>2</sub> film formed by introducing residual sulfur during low-temperature in 3%-H<sub>2</sub> annealing for three-dimensional ICs," Japanese Journal of Applied Physics, 56, 04CP06 (2017).
- [2] Wanjing Du, Takamasa Kawanago and Shunri Oda, "Use of self-assembled monolayers for selective metal removal and ultrathin gate dielectrics in MoS<sub>2</sub> field-effect transistors," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 4S, p. 04CP10, Apr. 2017.
- [3] S. Ishihara, Y. Hibino, N. Sawamoto, T. Ohashi, K. Matsuura, H. Machida, M. Ishikawa, H. Sudo, H. Wakabayashi, A. Ogura, "Select Effects of Reaction Conditions on MoS<sub>2</sub> Thin Film Formation Synthesized by Chemical Vapor Deposition using Organic Precursor," MRS Advances (First View Article) (2016).